

ИЗВЕСТИЯ

ТОМСКОГО ОРДЕНА ТРУДОВОГО КРАСНОГО ЗНАМЕНИ ПОЛИТЕХНИЧЕСКОГО

Том 19.

ИНСТИТУТА имени С. М. КИРОВА

1952 г.

**К ВОПРОСУ О ФИЗИЧЕСКОЙ ПРИРОДЕ ЗОЛОВОГО ИЗНОСА
В КОТЕЛЬНЫХ УСТАНОВКАХ**

И. К. ЛЕБЕДЕВ

Природа золowego износа, как и абразивного износа вообще, изучена в настоящее время слабо, поэтому в современной литературе можно встретить иногда неясные и неопределенные толкования этого явления, не вскрывающие его физической сущности. Так, например, научный сотрудник ВТИ Локшин В. А. по вопросу о природе золowego износа поверхностей нагрева котельных агрегатов пишет: „Износ труб лещей золой происходит за счет сил, возникающих при ударе частиц о поверхность металла. Изнашиваемая поверхность имеет отшлифованный вид, бугристая, но не имеет царапин“. [5]. Научный сотрудник ЦКТИ Сыркин в отношении золowego износа трубчатых поверхностей, каковыми являются поверхности нагрева котельных агрегатов, пишет: „Прежде всего отметим ударный механизм разрушения стенок труб в процессе золowego износа. Разрушение происходит в основном вследствие ударов твердых частиц золы, что доказывается как наблюдениями изношенной поверхности под микроскопом (чередующиеся выступы и впадины без продолговатых царапин), так и специальными лабораторными опытами. Следовательно, закономерности процесса скользящего износа или износа трения не применимы к данному случаю [7].

Член-корреспондент Академии Наук СССР проф. Кузнецов В. Д. в отношении природы абразивного износа, каковым, конечно, является и золовой износ, пишет: „Механизм износа в абразивной среде, несмотря на его кажущуюся сложность, мне представляется принципиально довольно простым. Процесс абразивного износа сводится к сумме большого числа элементарных процессов царапания. Между явлениями простого царапания и абразивным износом должна существовать глубокая связь“ [4, стр. 234].

Из рассмотрения вышеприведенных формулировок выясняются две противоположные точки зрения на природу золowego износа. Если из второй части формулировки Локшина можно лишь догадываться о неприменимости закономерностей износа, связанного с трением, к золowому износу котельных установок, то Сыркин ясно отрицает это. Проф. Кузнецов В. Д. прямо связывает процесс абразивного износа с процессом элементарных царапаний, происходящих при трении абразивных частиц об изнашиваемую поверхность. Попутно заметим, что формулировки Локшина и Сыркина очень неопределенны и неясны. Они указывают на природу возникновения сил между абразивными частицами и изнашиваемой поверхностью и совершенно не разъясняют механизма износа, отрицая лишь закономерности „скользящего“ износа.

На основании многочисленных наблюдений за золowым износом при эксплуатации котельных установок мы приходим к выводу о том, что определение природы абразивного износа, данное проф. Кузнецовым В. Д., является правильным и для случаев золowego износа. Золowой износ является суммой большого числа элементарных царапаний, производимых аб-

разивными (золотыми) частицами на поверхности изнашиваемого тела, независимо от природы и причин возникновения сил, действующих на золотые частицы.

Вывод уравнений, выражающих золотой износ

Рассматривая явления абразивного износа пластических тел и явления резания металлов, проф. Кузнецов приходит к выводу: о том, что как при резании, так и при абразивном износе энергия, прилагаемая как к резцу, так и к абразивной частице, главным образом расходуется на образование пластических деформаций снимаемого слоя металла. Таким образом, и резание и износ он относит к одному и тому же классу явлений, связанных с пластическими деформациями снимаемого слоя [4]. На этом основании кажется возможным применение закономерностей, установленных при резании, к исследованию абразивного износа металлов. Рассмотрим с этих позиций износ цилиндрического тела, омываемого поперечным газовым потоком, несущим абразивные золотые частицы.

При рассмотрении примем следующие упрощающие допущения:

1. Все золотые частицы, перемещающиеся с газовым потоком, перед ударом об изнашиваемую поверхность имеют скорость и направление движения, одинаковые со скоростью и направлением газового потока перед изнашиваемым цилиндрическим телом.

2. Золотые частицы при обтекании газовым потоком цилиндрического тела не отклоняются от первоначального направления и, следовательно, выпадают, в силу инерции, на поверхность обтекаемого тела.

3. Золотые частицы будем рассматривать как абсолютно твердые, не подвергающиеся разрушениям и деформациям во время ударов об изнашиваемую поверхность тела.

4. Каждая золотая частица имеет несколько заостренных углов или выступов, из которых одним или несколькими сразу она будет производить царапины при движении по поверхности изнашиваемого тела.

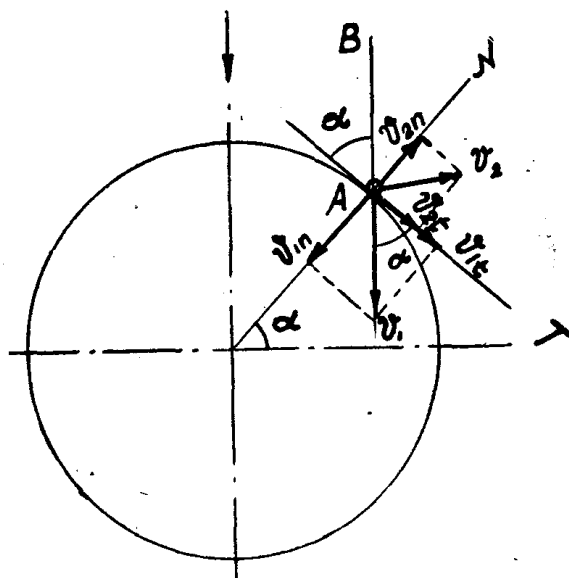
Пусть золотая частица выпадает на поверхность цилиндрического тела в точке A , имея скорость v_1 . Угол между направлением движения золотой частицы BA и касательной T к поверхности цилиндра обозначим α (фиг. 1). По прошествии времени τ , которое назовем временем удара, золотая частица отскочит от поверхности цилиндра со скоростью v_2 . Разложим скорости до и после удара на нормаль и касательную к поверхности в точке удара. Нормальные и касательные составляющие соответственно выразим v_{1n} , v_{2n} , v_{1t} и v_{2t} .

На основании гипотезы Ньютона

$$\frac{v_{2n}}{v_{1n}} = k, \quad (1)$$

отсюда

$$v_{2n} = kv_{1n}, \quad (2)$$



Фиг. 1

верхности цилиндра обозначим α (фиг. 1). По прошествии времени τ , которое назовем временем удара, золотая частица отскочит от поверхности цилиндра со скоростью v_2 . Разложим скорости до и после удара на нормаль и касательную к поверхности в точке удара. Нормальные и касательные составляющие соответственно выразим v_{1n} , v_{2n} , v_{1t} и v_{2t} .

На основании гипотезы Ньютона

где k — коэффициент восстановления, который зависит от упругих свойств соударяющихся тел и не зависит от скорости и размеров соударяющихся тел.

На основании теоремы о количестве движения нормальную составляющую импульса силы можно выразить следующим уравнением

$$S_n = m(v_{2n} - v_{1n}) = m(1 + k)v_1 \sin \alpha. \quad (3)$$

Касательную составляющую импульса можно выразить или проектируя импульс силы на касательную с учетом мгновенного коэффициента трения f , выражая v_{2t} аналогично тому, как это было сделано в уравнении (2) для v_{2n} или, как это часто делают, принимая, что касательная составляющая импульса силы связана с нормальной составляющей так же, как обычная сила трения с нормальной силой, причем за коэффициент трения принимается значение коэффициента трения для конечных, а не для мгновенных нормальных сил [6].

Определяя величину касательной составляющей импульса вторым способом, получим

$$S_t = -k_1 S_n = -km(1 + k)v^1 \sin \alpha, \quad (4)$$

где k_1 — коэффициент трения между соударяющимися телами.

Знак минус перед правой частью уравнения (4) определяет направление импульса.

С другой стороны, на основании теоремы импульсов

$$S_t = \int_0^{\tau} P dt, \quad (5)$$

где P — величина касательной силы,

t — время действия касательной силы.

Если принять среднее значение силы, то после интегрирования будем иметь

$$S_t = P\tau, \quad (6)$$

где τ — время действия силы P или время удара.

Из уравнений (4) и (6) найдем

$$P = k_1 \frac{m(1 + k)}{\tau} v_1 \sin \alpha. \quad (7)$$

Разобьем время удара τ , как это принято [6, стр. 129], на два промежутка: τ_1 — промежуток от начала соприкосновения соударяющихся тел до максимального сближения их центров вследствие упругих деформаций и τ_2 — промежуток от максимального сближения центров до момента отделения поверхностей друг от друга. В период τ_1 скорость движения абразивной частицы (при неподвижном изнашиваемом теле) и меняется от v_1 до нуля; при этом движение будем считать равномерно-замедленным. В период τ_2 скорость будет нарастать от 0 до v_2 и движение будет равноускоренным. В соответствии с этим будут изменяться касательные и нормальные составляющие v_t и v_n . Но в период удара, кроме упругих, будут происходить и пластические деформации, и в частности по направлению касательной будет происходить пластическое сжатие слоя металла некоторой толщины, подобно тому, как происходит пластическое сжатие срезаемого слоя при резании металлов под действием силы, действующей на резец по направлению движения резца и называемой в теории резания силой резания. Подобно тому, как при резании длина снятого слоя будет

равна величине хода резца, величина срезаемого слоя при ударе об изнашиваемую поверхность абразивной золы частицы может быть выражена

$$l = \frac{v_{1t} + 0}{2} \tau_1 + \frac{0 + v_{2t}}{2} \tau_2 = \frac{v_{1t}}{2} \tau_1 + \frac{v_{2t}}{2} \tau_2. \quad (8)$$

Выразим v_{2t} через v_{1t} в следующем виде

$$v_{2t} = f v_{1t}, \quad (9)$$

где t — коэффициент мгновенного трения.

Тогда

$$l = \frac{v_{1t}}{2} \tau_1 + f \frac{v_{1t}}{2} \tau_2 = \frac{v_1}{2} \cos \alpha (\tau_1 + f \tau_2). \quad (10)$$

Выразим ускорения равнозамедленного и равноускоренного движения абразивной частицы во время удара в следующем виде

$$\frac{dv_{1n}}{dt} = -C_1 \quad (11)$$

$$\frac{dv_{2n}}{dt} = C_2. \quad (12)$$

Разделяя переменные и интегрируя уравнение (11) в пределах от v_{1n} до 0 и от 0 до τ_1 , а уравнение (12) в пределах от 0 v_{2n} и от τ_1 до τ , получим

$$v_{1n} = C_1 \tau_1. \quad (13)$$

$$v_{2n} = C_2 (\tau - \tau_1) \quad (14)$$

Из уравнений (1), (13) и (14)

$$\frac{v_{2n}}{v_{1n}} = k = \frac{\tau - \tau_1}{\tau_1} \frac{C_2}{C_1}.$$

Обозначим

$$\frac{C_2}{C_1} = \delta,$$

тогда

$$k = \frac{\tau - \tau_1}{\tau_1} \delta. \quad (15)$$

С другой стороны

$$\tau = \tau_1 + \tau_2. \quad (16)$$

Решая уравнения (15) и (16) как систему, найдем

$$\tau_1 = \frac{\delta}{\delta + k} \tau, \quad (17)$$

$$\tau_2 = \frac{k}{\delta + k} \tau. \quad (18)$$

Коэффициент δ характеризует упругие свойства изнашиваемой поверхности. Для стали он, вероятно, будет близким к единице, поэтому для упрощения дальнейших уравнений мы будем принимать

$$\delta = 1,$$

при этом

$$\tau_1 = \frac{1}{1+k} \tau, \quad (19)$$

$$\tau_2 = \frac{k}{1+k} \tau. \quad (20)$$

Выразим теперь касательную составляющую импульса через скорости v_{1t} и v_{2t} . На основании теоремы о количестве движения и уравнения (9)

$$S_t = m(v_{2t} - v_{1t}) = -m(1-f)v_1 \cos \alpha. \quad (21)$$

Приравнявая правые части уравнений (4) и (21), получим

$$f = 1 - k(1+k) \operatorname{tg} \alpha. \quad (22)$$

Подставим τ_1 , τ_2 и f из уравнений (19), (20) и (22) в уравнение (10); при этом получим

$$l = \frac{v_1}{2} \cos \alpha \tau (1 - k_1 k \operatorname{tg} \alpha), \quad (23)$$

отсюда

$$\tau = \frac{2l}{v_1 \cos \alpha (1 - k_1 k \operatorname{tg} \alpha)}. \quad (24)$$

Подставим полученное значение τ из уравнения (24) в уравнение (7); при этом после несложных преобразований

$$P = k_1 \frac{m(1+k)}{2l} v_1^2 (\sin \alpha \cos \alpha - k_1 k \sin^2 \alpha). \quad (25)$$

Уравнение (25) выражает величину сил, действующих на золую частицу по касательной к изнашиваемой поверхности в точке удара. Если золую частицу с заостренными выступами, которыми она делает царапину на поверхности изнашиваемого тела принять за резец, то касательную составляющую сил, действующих на золую частицу, можно рассматривать как силы резания.

Для определения величины сил резания в зависимости от размеров стружки и других величин, характеризующих условия резания, различными авторами дается много уравнений, выведенных главным образом на основании экспериментальных данных. Так, например, Челюсткин [3] дает следующее уравнение

$$P = k_2 b a^{\xi}, \quad (26)$$

где P — сила резания;
 b — ширина среза;
 a — глубина среза;

k_2 и ξ — постоянные для данного материала.

Ввиду того, что значения ξ для различных обрабатываемых материалов мало отличаются друг от друга, то Челюсткин считает возможным для всех материалов принимать среднее значение $\xi = 0,75$ и выражать уравнение в следующем виде

$$P = k_2 b a^{0,75}. \quad (27)$$

Профессор Кузнецов В. Д., рассматривая процесс резания металлов как процесс пластического сжатия стружки, выводит для свободного резания следующую зависимость [3, стр. 157].

$$P = \sigma_0 f \cdot \zeta^{m_1}, \quad (28)$$

где P — сила резания;
 σ_0 — условный предел текучести при сжатии;
 ζ — коэффициент усадки стружки;
 m_1 — показатель политропы пластического сжатия;
 f_0 — площадь поперечного сечения среза.

Приравняем правые части уравнений (25) и (28)

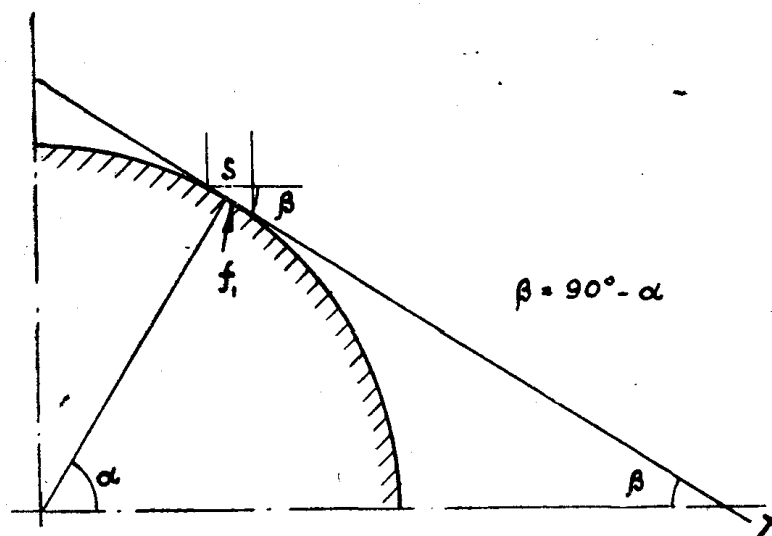
$$\sigma_0 f_0 \zeta^{m_1} = k_1 \frac{m(1+k)}{2l} v_1^2 (\sin \alpha \cos \alpha - k_1 k \sin^2 \alpha),$$

отсюда

$$V = k_1 \frac{m(1+k)}{2\sigma_0 \zeta^{m_1}} v_1^2 (\sin \alpha \cos \alpha - k_1 k \sin^2 \alpha), \quad (27)$$

где $V = f_0 l$ — объем металла, снятого с изнашиваемой поверхности одной абразивной золовой частицей с массой m .

Если возьмем на поверхности цилиндра, обтекаемого газовым потоком,



Фиг. 2

несущим золовые частицы, поверхность f_1 (фиг. 2), то количество ударов золовых частиц об эту поверхность в единицу времени будет

$$N = \frac{\mu}{mg} v_1 s = \frac{\mu}{mg} v_1 f_1 \cos \beta = \frac{\mu}{mg} v_1 f_1 \sin \alpha, \quad (28)$$

где μ — золовая концентрация газового потока кг/м^3 ;

mg — средний вес одной золовой частицы;

s — поверхность, нормальная к направлению движения газового потока.

Тогда износ поверхности f_1 за единицу времени можно выразить

$$V = VN = k_1 \frac{(1+k)}{2\sigma_0 \zeta^{m_1} g} v_1^3 \mu f_1 (\sin^2 \alpha \cos \alpha - k_1 k \sin^3 \alpha)$$

Выразим износ в следующем виде

$$V_t = a_t f_1, \quad (30)$$

где a_t — глубина износа или толщина среза.

Из уравнений (29) и (30)

$$a_t = k_1 \frac{(1+k)}{2\sigma_0 \zeta^{m_1}} v_1^3 \mu (\sin^2 \alpha \cos \alpha - k_1 k \sin^3 \alpha). \quad (31)$$

Износ поверхности за отрезок времени t будет выражаться

$$a = a_t = k_1 \frac{(1+k)}{2\sigma_0 \zeta^{m_1} g} v_1^3 \mu t (\sin^2 \alpha \cos \alpha - k_1 k \sin^3 \alpha). \quad (32)$$

Вывод уравнений, выражающих износ, базировался, как было видно на уравнении проф. Кузнецова В. Д., выражающем силы резания в зависимости от геометрических размеров среза и механических свойств изнашиваемого материала. Можно было бы при выводе использовать любое другое из многочисленных уравнений, выражающих силы резания. Нами сделан вывод уравнений износа, принимая за основу уравнения Челюстина. Но полученные таким образом уравнения отличаются от приведенных нами уравнений лишь некоторыми коэффициентами. Качественная сторона уравнений остается той же самой.

При выводе уравнений мы брали за исходное уравнение проф. Кузнецова еще и потому, что оно выведено из рассмотрения лишь главного фактора, определяющего величину сил резания, а именно пластические сжатия срезаемого слоя. Но, как показывают исследования в области резания, влияние дополнительных факторов при резании незначительно по сравнению с этим основным фактором.

Кроме этого, уравнение проф. Кузнецова наиболее просто выражает зависимость сил резания от геометрических размеров среза и физических свойств обрабатываемого материала, что является также его преимуществом при определении теоретических зависимостей для абразивного износа, коэффициенты которых для применимости к расчету количественной стороны износа должны определяться опытным путем.

Некоторый анализ выведенных уравнений и сопоставление их с экспериментальными данными

Из уравнений золотого износа видно, что величина износа зависит от величины угла, под которым абразивные частицы соударяются с изнашиваемой поверхностью. Определим величину угла, при котором износ будет максимальный. Для этого возьмем первую производную от уравнения (27) по α и приравняем ее нулю

$$\begin{aligned} \frac{dV}{d\alpha} &= k_1 \frac{m(1+k)}{2\sigma_0 \zeta^{m_1}} v_1^2 \left[\cos^2 \alpha_{ин} - \sin^2 \alpha_{ин} - 2k_1 k \sin \alpha_{ин} \cos \alpha_{ин} \right] = \\ &= k_1 \frac{m(1+k)}{2\sigma_0 \zeta^{m_1}} v_1^2 \left[\cos 2\alpha_{ин} - k_1 k \sin 2\alpha_{ин} \right] \end{aligned}$$

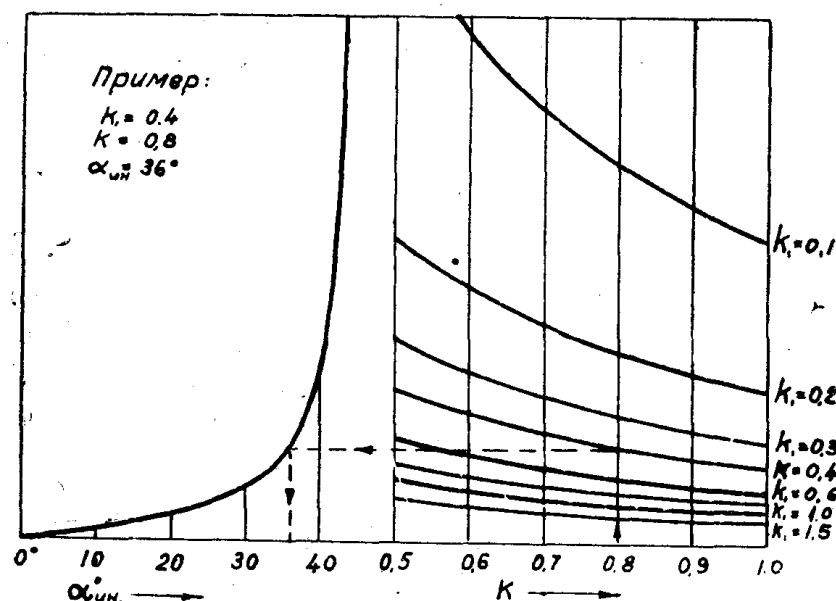
отсюда

$$\operatorname{tg} 2\alpha_{ин} = \frac{1}{k_1 k}. \quad (33)$$

Уравнение (33) показывает, что угол, при котором износ будет иметь максимальную величину, зависит от двух величин: от величины k_1 и k , иными словами, от природы соударяющихся тел и качества их поверхностей.

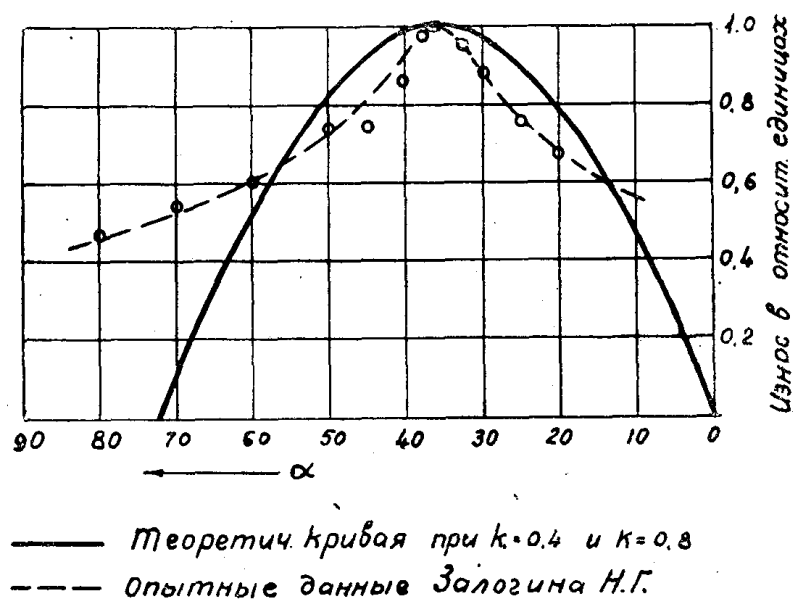
Для определения угла максимального износа нами на фиг. 3 представлена номограмма, построенная по уравнению (33), из которой видно, что

для широкого предела значений k_1 и k $\alpha_{ин}$ лежит в пределах от 30 до 40° и не может быть больше 45°. Этот вывод подтверждается экспериментальными данными, опубликованными в печати. Сотрудник ВТИ Залогин Н.Г. пишет [1]: „Специально поставленные опыты показали, что свободно летящие твердые частицы разрушают металл наиболее интенсивно, если



Фиг. 3

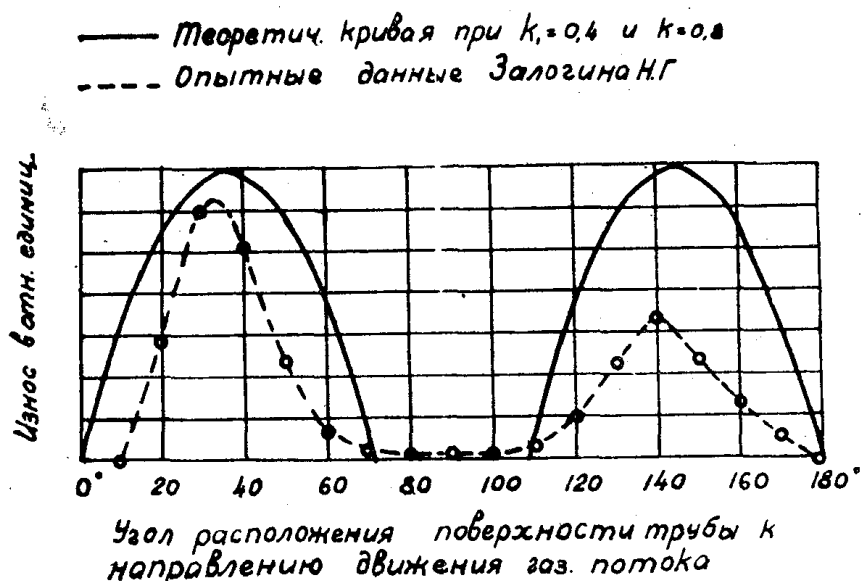
ударяются о его поверхность под углом, близким к 40°. Далее Залогин приводит результаты этих опытов в виде кривой, показанной нами на фиг. 4 пунктирной линией, а отдельные опытные точки нанесены в виде кружков. На этой же фигуре сплошной линией показан относительный



Фиг. 4

износ, подсчитанный нами при различных α при $k_1 = 0.4$ и $k = 0.8$ по уравнению (27). Как видно из сопоставления этих кривых, в пределах α от 20° до 60° опытная и теоретическая кривые имеют очень хорошее совпадение.

В этой же работе Залогин Н. Г. приводит данные об износе трубы, вырезанной из первого ряда водяного экономайзера. Для этой трубы, как пишет Залогин, был измерен не только износ металла по окружности, но также специальными опытами было измерено распределение количества ударов частиц золы по окружности трубы. После этого были построены кривые интенсивности износа и распределения ударов по поверхности. Делением ординат первой кривой на ординаты второй была получена кривая интенсивности износа в зависимости от угла падения частиц на поверхность трубы. Эта кривая приведена нами на фиг. 5 в виде пунктирной линии. На этой же фигуре построена теоретическая кривая (сплошная



Фиг. 5

линия) по уравнению (27). Сопоставление этих кривых также показывает достаточное их совпадение.

Для количественного определения золотого износа в настоящее время имеется только одно эмпирическое уравнение, выражающее утонение стенки трубы в наиболее опасном месте трубного шахматного пучка с поперечным омыванием его газовым потоком, несущим абразивные частицы. Для этого пучка наиболее опасным в отношении износа местом являются трубы второго ряда по ходу газов, так как по эксплуатационным наблюдениям и по экспериментальным данным ВТИ эти трубы имеют максимальный износ.

Это экспериментальное уравнение имеет следующий вид [5]

$$I = 3\varphi AKM(\beta_0)(\beta_1 v_1)^3 \tau, \quad (34)$$

где I — утонение стенки трубы в опасной точке пучка;
 3 — отношение максимального утонения к среднему по периметру трубы 2 ряда шахматного пучка;
 φ — коэффициент, отражающий геометрические формы пучка;
 A — коэффициент, характеризующий абразивные свойства золы при средней крупности золотых частиц 30—40 микрон;
 K — экспериментальный коэффициент, учитывающий влияние крупности частиц золы;
 M — коэффициент истираемости металла труб, равный для котельных углеродистых сталей 1,0;

β_p и β_{v_1} — коэффициенты неравномерности полей золотой концентрации и скорости газов;

v_1 — средняя скорость набегающего потока перед пучком;

μ — средняя концентрация золы в газовом потоке;

τ — время в часах.

Для определения φ , A и K даются опытные данные.

Если сравнить полученное нами теоретическим путем уравнение для выражения износа с только что приведенным уравнением ВТИ, то нетрудно видеть, что имеется совпадение влияния основных факторов, какими являются v_1 , μ и τ .

Таким образом, сопоставление опытных данных по золотому износу с теоретическими уравнениями, выведенными выше, исходя из предпосылки, что золотой износ является суммой элементарных царапаний, подтверждает такое толкование природы золотого износа.

Вид и форма поверхности изношенных деталей

Одной из причин, послужившей поводом для отрицания механизма царапания при объяснении природы золотого износа, явился вид изношенной поверхности, на что, как было видно выше, ссылаются и Локшин и Сыркин. Не вдаваясь в подробное описание формы стружки, снимаемой золотой частицей при ударе об изнашиваемую поверхность, подсчитаем порядок числа, определяющего длину срезаемого слоя. Ранее мы нашли, что длина снимаемого слоя определяется уравнением (23)

$$l = \frac{v_1}{2} \cos \alpha \tau (1 - k_1 k \operatorname{tg} \alpha).$$

Если принять $k_1 = 0,4$, $k = 0,8$ и подсчитать длину срезаемого слоя в месте максимального износа, то есть под углом $\alpha = 36^\circ$, то получим

$$l = \frac{v_1}{2} 0,809 (1 - 0,4 \cdot 0,8 \cdot 0,726) \tau = 0,31 v_1 \tau. \quad (35)$$

Из теории соударения шаров по Герцу [2, стр. 47]

$$\tau_{\max} = 2,9432 \frac{\xi_{\max}}{v_0}, \quad (36)$$

где ξ_{\max} — максимальное сближение центров соударяющихся тел вследствие их деформации при ударе;
 $v_0 = v_1 \sin \alpha$ — относительная скорость соударяющихся тел в начале удара.

Подставляя значение τ_{\max} в уравнение (35), найдем

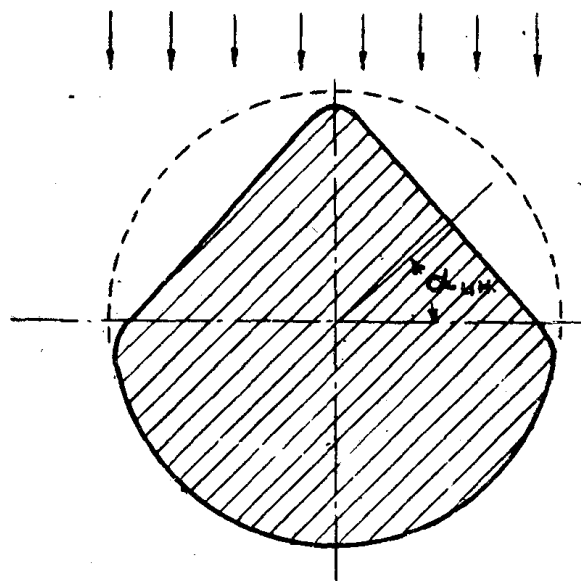
$$l = \frac{0,31 \cdot 2,9432}{\sin \alpha} \xi_{\max} = 1,57 \xi_{\max}. \quad (37)$$

Можно было бы вычислить ξ_{\max} , но и без этих вычислений совершенно ясно, что при соударении абразивной частицы весьма малых размеров с неподвижным цилиндром эта величина будет исчезающе малой, следовательно, и длина стружки будет чрезвычайно малой величиной.

Если рассмотреть траекторию острого выступа абразивной частицы, снимающего стружку с поверхности изнашиваемого тела во время удара,

то можно убедиться в том, что эта траектория будет расположена не по прямой линии, параллельной касательной в месте удара, а будет описывать некоторую кривую сложного вида, в соответствии с чем продольное сечение снимаемой стружки будет иметь также сложный вид, напоминающий форму неправильной чечевицы, а царапина, оставляемая на поверхности изнашиваемого тела, будет иметь форму несколько продолговатой воронки. Если учесть еще при этом непрерывное наложение этих воронок одна на другую в процессе износа, то окажется трудным представить себе возможность каким-либо образом рассмотреть „продольные царапины“ на изнашиваемой поверхности в том виде, как мы их обычно привыкли понимать и как о них пишут Локшин и Сыркин.

Что касается формы изношенных деталей, то под углом максимальной интенсивности износа на поверхности создаются площадки, как это показано на фиг. 6, причем величина этих площадок увеличивается по мере износа, вызывая тем самым увеличение удельного износа, если этот износ относить на всю поверхность детали. В отношении цилиндра в результате этого процесса мы получаем форму изношенной детали, показанную на фиг. 6.



Фиг. 6

Заключение

В результате проведения аналитических исследований и сопоставления их с опытными данными нами установлено:

1. Золовой износ является суммой большого числа элементарных царапаний, производимых абразивными золовыми частицами на поверхности изнашиваемых деталей.

2. Процесс износа металла абразивными частицами аналогичен процессу резания металлов резцом.

3. Угол падения частиц на поверхность, при котором происходит максимальный износ, зависит от упругих свойств абразивной частицы и изнашиваемого тела и от степени шероховатости их поверхности, определяющей коэффициент трения между ними. Во всех случаях этот угол не может быть более 45° .

4. Для цилиндрических поверхностей (трубные пучки паровых котлов) износ выражается пропорционально кубу скорости набегающего потока и первой степени золотой концентрации и времени действия потока.

5. Изношенные детали должны иметь матовую поверхность с чередующимися выступами и впадинами, что отвечает действительному виду изношенных поверхностей.

6. Принятый нами метод исследования износа с дополнением его экспериментальным определением коэффициентов открывает широкие возможности получения расчетных формул для различных случаев золотого износа.

ЛИТЕРАТУРА

1. З а л о г и н Н. Г. Борьба с абразивным износом оборудования электростанции. „Эл. станции“ № 2, 1950.
 2. К и л ь ч е в с к и й Н. А. Теория соударения твердых тел. Гостехиздат. М.-Л., 1949.
 3. К у з н е ц о в В. Д. Физика твердого тела. Том III, Изд. „Красное Знамя“. Томск, 1944.
 4. К у з н е ц о в В. Д. Физика твердого тела. Том IV, Изд. Полиграфиздата. Томск, 1947.
 5. Л о к ш и н В. А. Снижение интенсивности золowego износа поверхностей нагрева коглоагрегатов. „Изв. ВТИ“ № 7, 1947.
 6. Л о й ц я н с к и й Л. Г. и Л у р ь е А. И. Теоретическая механика. Часть вторая. Динамика. Гостехиздат. М.-Л., 1933.
 7. С ы р к и н С. Н. Золовой износ трубчатых поверхностей нагрева. Сборник материалов по обмену опытом в энергосистемах. Главуралэнерго, вып. 1, Металлургиздат, Москва—Свердловск, 1945.
-

ЗАМЕЧЕННЫЕ ОПЕЧАТКИ

Стр.	Строка	Напечатано	Следует
24	2 снизу	$\gamma_r = S \cdot P$	$\gamma_r = S P_r$
41	4 сверху	цитированная	цитированная
57	5 сверху	термо-и гидродинамические	термо- и гидродинамические
69	11 снизу	теплоносителя	теплоносителя
85	10 снизу	$\frac{dV}{d\alpha} =$	$0 = \frac{dV}{d\alpha} =$
102	17 снизу	бессейнов	бассейнов
178	фиг. 1	в процесс	в процессе
185	14, 15, 17 снизу	э	е
204	7 сверху	огд	год
210	6 снизу	где $860 N_{mk} = 860 (N_{lk} - N_{k})$	где $860 N_{mk} = 860 (N_{lk} - N_{\partial k})$
211	9 сверху	$N_{k} = N_{k} + N_{no}$	$N_{\partial} = N_{\partial k} + N_{\partial no}$
211	18 сверху	$D_k = \frac{860 N_{k}}{(i_0 - i_k) \eta_m \eta_z} =$	$D_k = \frac{860 N_{\partial k}}{(i_0 - i_k) \eta_m \eta_z} =$